

## 炭酸ガス硬化法を用いたコンクリート廃材の環境調和型固化法の開発に関する研究

著者	河 済昌
号	1897
発行年	1996
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7170">http://hdl.handle.net/10097/7170</a>

氏 名	Ha 河	Je 済	Chang 昌
授 与 学 位	博士（工学）		
学 位 授 与 年 月 日	平成9年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程） 機械工学第二専攻		
学 位 論 文 題 目	炭酸ガス硬化法を用いたコンクリート廃材の 環境調和型固化法の開発に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 庄子哲雄		
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄子哲雄 東北大学教授 近藤達男 東北大学教授 三橋博三 東北大学助教授 橋田俊之		

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒言

近年、材料開発においても自然環境保護のための配慮が求められており、素材機能の向上と環境保全を同時に満たす合成ルートの開発が必要となっている。特に、材料のリサイクルの観点から産業廃棄物を積極的に再利用する技術の開発が求められてきている。その一つに、建設業から出る廃棄物としてコンクリート廃材がある。ここ数年、コンクリート廃材は量的に増大する傾向にあり、そのほとんどが埋立によって処分されているのが現状である。

また地球温暖化の主要因である  $\text{CO}_2$  ガスの課題もある。産業革命以来の急速なエネルギー消費の増加に伴い、大気中に排出され続けられている多量の  $\text{CO}_2$  の対策については、世界的な緊急の課題となっている。この  $\text{CO}_2$  ガス問題の基本的な対策は、化石燃料資源の消費をおさえることにある。従って、 $\text{CO}_2$  を単に物理的、生物的または化学的に回収、固定、貯蔵するだけでは、それが累積するのみで恒久的な解決法にはならない。 $\text{CO}_2$  を積極的に再資源化に有効利用するのが望ましい方法であろう。

そこで本論文では、「炭酸ガス硬化法」という新しい固化合成技術を用いて、コンクリート廃材の固化合成を行う。「炭酸ガス硬化法」とはケイ酸カルシウムが  $\text{CO}_2$  ガスと反応して固化する機構に着目した新しい省エネルギー、環境調和型固化法である。また、原料をコンクリート廃材、固化させるために  $\text{CO}_2$  を利用するので環境への負荷はほとんどなく、温暖化の主要因の一つである  $\text{CO}_2$  を用いて作製するという点で非常に有意義な技術となりうる可能性を秘めている。この固化合成技術を用いて、新しい再生建築材料の開発を目指す。また、 $\text{CO}_2$  を積極的に利用するため、発電所などからの排ガス

の直接利用の検討も行う。コンクリート廃材としてオートクレーブ養生軽量気泡コンクリート (Autoclaved Lightweight Concrete : 以下 ALC) の切削くずを出発原料とし、炭酸ガス硬化法における炭酸ガス吸収量の評価を行う。その後、固化合成の最適化と機械的評価を行い、それをもとに、建築用パネル材に不可欠な靱性向上を目的にコンクリート廃材に短繊維を複合し、靱性改善の検証を行う。

## 第2章 炭酸ガス硬化法の原理と装置

第2章では、ケイ酸カルシウムが  $\text{CO}_2$  ガスと反応し、セメント粒子間に炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )が形成されて微細空隙を充填し、組織の緻密化に寄与すると同時にセメント粒子間のバインダーとして作用し固化する機構に着目した、炭酸ガス硬化法の原理と装置の説明をする。 $\text{CO}_2$  ガスが微量の水に溶解して  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  と  $\text{H}^+$  イオンを発生する。この酸性溶液中でセメントの  $\text{CaO}$  の  $\text{Ca}^{2+}$  イオンがリーチングされて炭酸イオンと結合し炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )が粒子間に形成されるというものである。炭酸カルシウムの形成は、微細空隙を充填し組織の緻密化に寄与すると同時にセメント粒子間のバインダーとして作用し、固化させるのである。

## 第3章 炭酸ガス硬化法における炭酸ガス吸収量の評価

本章では、第2章で説明した炭酸ガス硬化法を用いて ALC 廃材を処理し、ALC 廃材が吸収する  $\text{CO}_2$  量を化学分析的手法を用いることにより評価する。具体的には反応時間、温度ならびにプレス圧が  $\text{CO}_2$  吸収量に及ぼす影響を調査し、処理条件の影響を明らかにする。この結果、炭酸ガス硬化法による ALC 廃材処理方法の最適化を図るための基礎的知見を与えるものとなる。すなわち、 $\text{CO}_2$  吸収量に関する結果は生成する  $\text{CaCO}_3$  量の尺度となるものであり、第4章で実施する炭酸ガス硬化法を用いた ALC 廃材固化体の高強度化に関する検討の基礎となる。加えて、火力発電所の  $\text{CO}_2$  ガスを含む排ガスを本炭酸ガス硬化法の  $\text{CO}_2$  源として用い、環境への  $\text{CO}_2$  放出を低減させることも考えられる。従って、固化体の高強度化のみならず、排ガス中の  $\text{CO}_2$  量を低減させるための技術の開発の観点からも、上述の炭酸化に伴う  $\text{CO}_2$  吸収量すなわち  $\text{CO}_2$  吸収量の評価は重要な知見を与えることが期待される。固化合成条件による  $\text{CO}_2$  吸収特性を調べ、合成条件による  $\text{CO}_2$  処理の影響を明らかにし、炭酸ガス硬化法における炭酸ガス吸収量の評価を行った。また直接排ガスを利用しコンクリート廃材を固化させ、再利用する可能性について検討も行い、次のような結果を得た。

固化体の炭酸ガス吸収量は養生温度  $60^\circ\text{C}$ 、プレス圧  $40\text{MPa}$  の場合に最も大きいことがわかった。この条件における固化体の炭酸ガスの吸収量は約  $10\text{wt}\%$  であった。 $\text{CO}_2$  処理により、固化体中には炭酸カルシウムが生成していることを X 線回折、破面観察ならびに薄片観察により明らかにした。また、 $60^\circ\text{C}$  の養生温度で約  $10\text{wt}\%$  の炭酸ガスを処理していることは火力発電所ボイラーの排ガスの温度が  $60^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$  でありかつ  $12 \sim 17\%$  の水を含んでいることから、炭酸ガス硬化法を用いて、直接排ガスを利用しコンクリート廃材を固化させ、再利用する可能性が十分にあると考えられる。またエネルギーをほとんど使わないのが本方法の利点である。

#### 第4章 コンクリート廃材の固化合成および固化体の機械的評価

本章では、コンクリート廃材を炭酸ガス硬化法を用い固化合成を試み、その最適条件の検討および4点曲げ試験による固化体の機械的強度の評価を行った。コンクリート廃材を炭酸ガス硬化法を用い固化合成し、その最適条件を見いだした。また、3章で調べた炭酸ガス吸収量と曲げ強度特性との関連性についての検討も行った。以下に得られた知見を示す。

炭酸ガス硬化法を用いることにより、軽量コンクリート廃材の固化体を合成できることを見いだした。含水量（水 / ALC 切削くず）が40～50wt%、プレス圧40MPa、養生温度60℃の最適な固化合成条件が得られた。また、固化体の曲げ強度は12MPaとなりこれはALC材の曲げ強度に比べ3倍以上の強度であることがわかった。このことは、CO<sub>2</sub>吸収による緻密化が大きな強度向上に寄与したと考えられる。

#### 第5章 短繊維複合による固化体の高強度、高靱性化

前章では、水分量、プレス圧、養生温度の影響を検討することにより、固化体の強度を向上させる最適のCO<sub>2</sub>処理条件を見いだした。これにより4点曲げ試験により評価された強度は12MPaに達した。しかしながら作製した固化体の破壊エネルギーは0.1～0.2kJ/m<sup>2</sup>程度であり、依然として脆性材料であるにとどまっている。従って、将来、炭酸ガス硬化法で製造したコンクリート廃材の固化体を、建築用パネル材などに適用するためには、靱性の改善が必要である。

本章では木材代替建築材料の開発を志向して、4章で合成された固化体に対して数種類の短繊維による複合化を図る。繊維添加量、アスペクト比などの繊維パラメータ、マトリックス強度および界面強度などのパラメータが複合材料の機械的特性に及ぼす効果を調べ、固化体の高靱性化のための検討を行う。特にマルチプルクラック挙動を利用した高靱性化に関する検討に加えて、2種類の繊維を用いたハイブリッド化に関する検討を行い、高強度でかつ高靱性の短繊維複合強化材料の開発を目指し、次のような結果を得られた。

マルチプルクラックの誘起が強度、特に靱性の向上の有効性を示し、マルチプルクラックの発生条件は、 $V_{fcrit}$ により予測できることを示した。また、PVA繊維の使用が強度の向上に最も有効なことを示し、ポリエチレン、ポリエステル繊維は靱性の向上に有効であることを示した。両タイプの繊維の特性を兼ね備えたものが繊維のハイブリッド化によって作製できることがわかった。またキトサン添加によって複合材料の高強度化を図れることを示した。さらに、ハイブリッド化に加えてキトサン添加を同時に行った複合材料においては曲げ強度18MPa、破壊エネルギー10kJ/m<sup>2</sup>を示し、木材と同程度の機械的特性を有する複合材料の作製が可能であることを示した。以上の結果から、炭酸ガス硬化法を用いてALC切削くずであるコンクリート廃材から、ほぼ木材と同程度の機械的特性を有する建築用パネル材料を作製できる可能性があることを示すことができた。

第6章は、結論である。

## 審 査 結 果 の 要 旨

材料開発においても環境問題に対する配慮が求められており、要求される性能・機能と環境調和性を両立させた材料開発の展開が要求されている。本論文は、コンクリート廃材の再利用技術の開発を目的として炭酸ガス硬化法の開発を行い、木材代替建築素材として再利用するための設計・合成・評価に関する検討を実施し、その結果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、コンクリートの中性化すなわちケイ酸カルシウムと炭酸ガスが反応して炭酸カルシウムが形成される機構に着目し、コンクリート廃材を再固化させるための炭酸ガス硬化法を提案している。これは二酸化炭素の固定の観点から重要な知見である。

第3章では、コンクリート廃材として軽量コンクリートのミリングダストを対象に、炭酸ガス硬化法を適用することにより固化実験を行い、特に処理条件の炭酸ガス吸収量に及ぼす影響を検討している。これにより、室温から100℃までの処理温度範囲において、約1日の処理時間でコンクリート廃材を固化しうることを、ならびに吸収される炭酸ガス量は固化体に対して重量比で10%程度であることを示している。

第4章では、炭酸ガス処理条件の固化体強度に及ぼす影響に関する詳細な検討を行い、通常のコンクリート強度を超える約10MPaの曲げ強度を有する固化体の作製に成功している。さらに、最適の処理条件は火力発電所の排ガスの条件にほぼ近いことを示し、本法をコンクリート廃材の固化処理のみならず排ガス中の二酸化炭素の固定化技術として開発しうる可能性のあることを示している。これは有用な知見である。

第5章では、炭酸ガス硬化法により作製された固化体の変形特性を改善するために、有機短繊維を用いた複合化に関する検討を行っている。繊維量、繊維寸法を最適化することによりマルチプルクラックを誘起し、さらに強化素材のハイブリッド化を図ることにより、木材の機械的特性に匹敵する固化体の合成に成功している。これは工業的に有益な知見である。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、コンクリート廃材を炭酸ガス硬化法により固化し木材代替素材として再利用する方法を提案したものであり、機械工学ならびに建築材料学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。